Ferdowsi Civil Engineering, 38, 1, 2025. (29-48)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Prediction and Analysis of the Probability of Climate Change and Water Scarcity in Yazd

Research Article

Mohammadreza Goodarzi[1], Maryam Sabaghzadeh[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.88585.1306

1. Introduction

Water resource management has long been a fundamental challenge for human societies. The rapid expansion of urbanization has exacerbated this issue, particularly in arid regions where water scarcity is inherently severe. In these areas, characterized by low precipitation and high evaporation rates, communities typically rely on groundwater extraction. However, this solution faces growing limitations due to problems like land subsidence, prompting policymakers to explore alternative approaches such as inter-basin water transfers.

Recent climate change impacts have further intensified water stress in these regions through decreased precipitation and increased temperatures. This trend is particularly evident in arid zones, where diminishing water availability has significantly compounded existing supply challenges in recent years.

2. Materials and Methods

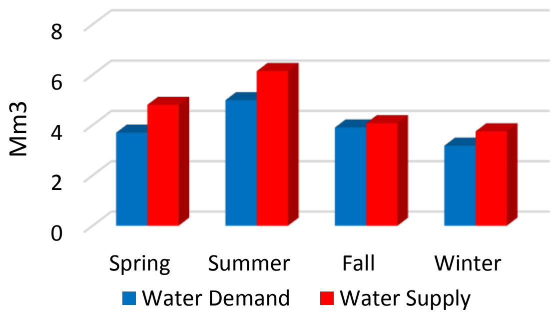
This study developed a water scarcity index by analyzing the balance between water supply and demand in Yazd City - a region with a hot, arid climate and chronic water shortages. Using monthly water supply-demand data from 2013-2014, we employed an LSTM (Long Short-Term Memory) deep neural network to forecast water scarcity patterns over a 20-year horizon.

To assess climate change impacts, we incorporated projections from the IPCC's Sixth Assessment Report using the HadGem3-GC31-LL model under three SSP scenarios (SSP126-optimistic, SSP245-moderate, SSP585-pessimistic). The study calculated conditional probabilities for various water scarcity conditions based on predicted temperature and precipitation changes from 1980-2010 baseline data.

3. Results

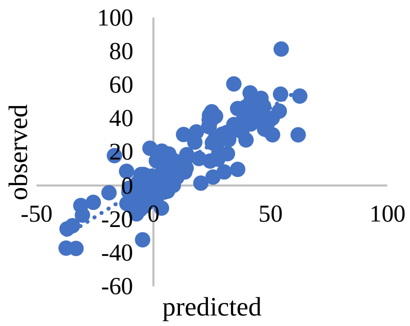
Seasonal Water Patterns:

- Summer showed the highest water demand (35% above spring baseline) and supply (28% above spring)
- Winter recorded the lowest consumption (14% below spring) with 22% higher supply
- Negative scarcity indices occurred in January, May, and November (demand exceeding supply)
- March, April, and June showed the most favorable water balances.



Model Implementation:

- LSTM network utilized ReLU activation and Adam optimization
- Trained on 2011-2022 monthly data (80% training, 20% testing)



---

*Manuscript received June 21, 2024, Revised September 25, 2024, Accepted October 12, 2024.

[1] Corresponding Author, Associate Professor of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. **Email**: goodarzimr@um.ac.ir

[2] Ph.D. Student in Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Climate Projections:

- Temperature increases:
  - SSP126: +0.7°C (annual max +0.34°C)
  - SSP245: +0.81°C (+0.14°C)
  - SSP585: +1.26°C (+0.45°C)
- Precipitation changes:
  - SSP126: +77.7%
  - SSP245: +96.69%
  - SSP585: +95.61%

Risk Probabilities:

- SSP126: 34% probability of high-risk scenario (low precipitation, high temperature, high scarcity)
- SSP126: 29.7% probability of favorable conditions
- SSP245 showed increased critical scarcity probabilities
- SSP585 paradoxically indicated both increased precipitation and higher zero-scarcity probabilities

4. Conclusions

1. Despite summer's 35% higher demand, supply management has effectively prevented seasonal shortages in Yazd's extreme heat conditions.
2. All climate scenarios project increased precipitation for Yazd, with gains ranging from 77.7% to 96.69%.
3. Paradoxically, high water scarcity probabilities persist despite projected rainfall increases, suggesting demand growth may outpace supply gains.
4. As results derive from a single GCM (HadGem3-GC31-LL), future studies should incorporate multi-model ensembles to address projection uncertainties.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

پیش‌بینی و تحلیل احتمال وقوع تغییرات اقلیمی و کمبود آب در یزد*

مقاله پژوهشی

محمدرضا گودرزی [(۱)]

مریم صباغ زاده[(۲)]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.88585.1306

چکیده *شهر یزد از دیرباز به دلیل اقلیم گرم و خشک با مشکل کم‌آبی مواجه بوده است و همواره مدیران منطقه تلاش کرده‌اند از طرق مختلف آب مورد نیاز را تأمین کنند. این مطالعه با تعریف شاخص کمبود آب بر اساس عرضه و تقاضای آب در ۱۲ سال گذشته و پیش‌بینی آن برای ۲۰ سال آینده با استفاده از روش Long Short-Term Memory (LSTM) به بررسی این موضوع پرداخته است. با توجه به نتایج، در فصل تابستان میزان مصرف آب بیشتر از سایر فصول بود. لذا به بررسی اثر تغییرات آب و هوا بر روی کمبود آب پرداخته شد. بدین منظور دما و بارش آینده با مدل اقلیمی HadGEM3-GC31-LL و با سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 که به ترتیب سناریوهای خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه هستند، پیش‌بینی گردید. سپس، ۸۱ حالت مختلف با توجه به تغییرات دما، بارش و کمبود آب تدوین شد و احتمال وقوع هر کدام با استفاده از احتمال شرطی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با وجود پیش‌بینی افزایش بارش سالانه تا ۷۷٪ در سناریوی خوش‌بینانه و تا بیش از ۹۰٪ در دو سناریوی دیگر، در آینده احتمال وقوع کم‌آبی شدید بیشتر خواهد بود. لذا تصمیم‌گیرندگان این منطقه همواره باید به فکر راه‌هایی جهت کاهش مصرف و افزایش تأمین آب باشند.*

واژه‌های کلیدی شاخص کمبود آب، تغییر اقلیم، LSTM، احتمال شرطی.

Prediction and Analysis of the Probability of Climate Change and Water Scarcity in Yazd

Mohammad Reza Goodarzi   Maryam Sabaghzadeh

Abstract *Yazd, a city historically challenged by a hot and dry climate, has long faced water scarcity issues. Regional managers have consistently sought various methods to secure the necessary water supply. This study examines the situation by defining a water scarcity index based on water supply and demand over the past 12 years and forecasting it for the next 20 years using the LSTM method. According to the results, water consumption is higher in the summer compared to other seasons. Consequently, the impact of climate change on water scarcity was investigated. Future temperature and precipitation were predicted using the HadGEM3-GC31-LL climate model under three scenarios: SSP126 (optimistic), SSP245 (moderate), and SSP585 (pessimistic). Subsequently, 81 different scenarios were developed considering variations in temperature, precipitation, and water scarcity, with the probability of each occurring calculated using conditional probability. The results indicate that despite the increase in annual forecasted precipitation by up to 77% in the optimistic scenario and over 90% in the other two scenarios, the likelihood of severe water scarcity in the future will be higher. Therefore, regional decision-makers must continually seek ways to reduce consumption and enhance water supply.*

Key words climate change, Water Shortage Index, LSTM**,** Conditional probability.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۷/۲۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۲) دانشجوی دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

Email: Goodarzimr@yazd.ac.ir

مقدمه

تأمین آب از دیرباز یکی از دغدغه‌های اساسی بشر بوده است [1,2]. با گسترش شهرنشینی این مسئله به یکی از مسائل اساسی مدیران تبدیل شده است [3,4]. این موضوع به خصوص در شهرهای واقع در مناطق با آب و هوای خشک جدی‌تر بوده است [5]. در این شهرها میزان بارندگی بسیار کم و در مقابل میزان تبخیر زیاد است و معمولا تأمین آب در این مناطق وابسته به آب‌های زیرزمینی است [6]. هر چند برداشت آب از آب‌های زیرزمینی نیز به دلیل پیدایش مشکلاتی نظیر فرونشست دارای محدودیت‌هایی است و در سال‌های اخیر تصمیم‌گیرندگان این مناطق برای تأمین آب از روش‌های دیگری نظیر انتقال آب نیز استفاده کرده‌اند [7-9]. در سال‌های اخیر به دلیل پدیده تغییر اقلیم، کشور ما با کاهش بارش و افزایش دما نیز مواجه بوده است که باعث شده میزان آب در دسترس کاهش یابد [10,11]. این موضوع در مناطق خشک بیشتر احساس شده و باعث افزایش مشکل تأمین آب در سال‌های اخیر در این مناطق شده است [4].

در مطالعات گذشته به روش‌های مختلفی میزان کمبود آب در مناطق گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای مختلفی نیز که بر روی تنش آبی تأثیرگذار هستند، تاکنون در مطالعات در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه به چند مورد از این مطالعات اشاره شده است:

بزرگ حداد و همکاران [12] با استفاده از سنجش از دور پایین رفتن سطح آب را در کشورهای خاورمیانه محاسبه کردند که نشان دهنده کاهش ذخیره کل آب در آن منطقه است. بدین ترتیب وضعیت مصرف و تأمین آب را در کشورهای خاورمیانه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که لبنان، سوریه، عراق و ایران کشورهایی هستند که شاخص کم آبی بسیار منفی دارند. از جمله راهکارهایی که برای رفع این مشکل می‌تواند مؤثر واقع شود همکاری‌های بین‌المللی و تجارت آب مجازی است. بهمنی بهلولی و همکاران [13] جهت بررسی و تحلیل ارتباط میزان و مصرف آب شهری با عوامل مختلف در شهرستان زرقان از سیستم دینامیک استفاده کردند. برای این کار از نرم‌افزار Vesim DSS استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف نشان داد که ساخت و ساز از مهم‌ترین عوامل افزایش مصرف آب شهری است و در مورد مصرف آب برای فضای سبز شهری نیز مهم‌ترین عامل نوع پوشش گیاهی است. Dau و همکاران [14] برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر روی میزان آب در دسترس، در حوضه رودخانه هوانگ چین، با استفاده از دو سناریوی تغییر اقلیمی مختلف، دما و بارش آینده را پیش‌بینی کردند. سپس با استفاده از HEC-HMS مدل‌سازی بارش ـ رواناب انجام شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار WEAP تأثیر افزایش جمعیت و تغییر اقلیم بر روی مقدار آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بارش ۱ تا ۸٪ و دما ۰٫۲ تا ۳٫۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و به دلیل افزایش بارش تا سال ۲۰۸۰ در صورتی که افزایش جمعیت صورت نگیرد، کمبود آبی در منطقه وجود نخواهد داشت. Heidari و همکاران [15] تأثیر الگوهای مختلف توسعه شهری را بر روی میزان کمبود آب مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SWAT و سناریوهای تغییر اقلیم میزان آب در دسترس آینده محاسبه شد و با استفاده از مدل یکپارچه آب شهری (IUWM) میزان تقاضای آب در آینده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مناطق شهری تحت الگوی توسعه پراکنده در مقایسه با الگوی تراکم بالا کمبود آب را با شدت، مدت و فراوانی بالاتر تجربه خواهند کرد. تابش و همکاران [16] با دو روش شبکه بیزین و تابع استون ـ گری مصرف آب شهری را به صورت بلندمدت پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که شبکه بیزین به دلیل در نظر گرفتن روابط علی و معلولی و در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی بهتر عمل می‌کند. مقایسه بین دو مدل نشان داد که دقت شبکه بیزین به مقدار ۵۱٪ بیشتر از تابع استون ـ گری است. غفاری مقدم و همکاران [17] برای پیش‌بینی مصرف آب شهری در سیستان از پنج الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده کردند و مصرف آب شهری را برای سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۴ تخمین زدند. نتایج نشان داد که در مدل نمایی و هیبرید الگوریتم NDFA (New dynamic firefly alghorithm) دارای کمترین میزان خطاست و در مدل خطی الگوریتم VSSFA (Variable Step Size Firefly Algorithm) دارای کمترین میزان خطا بود. همچنین اوج مصرف در ماه‌های تیر و مرداد بود.

همان‌طور که مشاهده شد تا کنون در هر یک از مطالعات انجام شده برای ارزیابی کمبود آب تنها بخشی از عوامل مؤثر را در نظر گرفته‌اند و یا مصرف آب را در بخش کوچکی در نظر گرفته‌اند و یا فقط بر روی گذشته مطالعه کرده و برای آینده پیش‌بینی نداشته‌اند. در این مطالعه کمبود آب در مقیاس شهری در نظر گرفته شد. بدین منظور شهر یزد به عنوان شهری که در

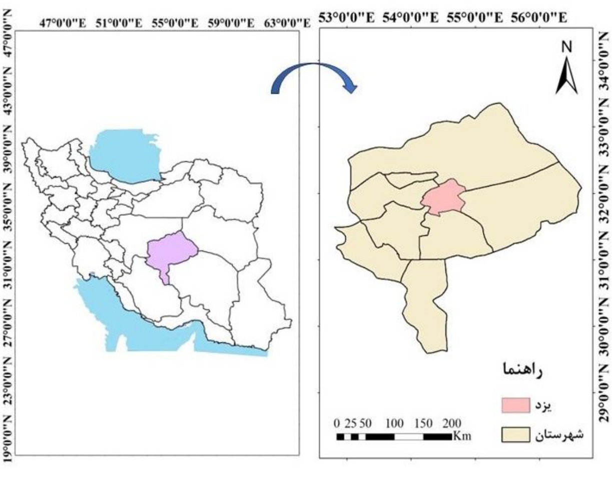
منطقه گرم و خشک واقع شده است و همیشه تأمین آب از مشکلات اساسی آن بوده است مورد بررسی قرار گرفت. برای این امر با استفاده از میزان عرضه و تقاضای آب شهر شاخصی با عنوان شاخص کمبود آب تعریف گردید. اما برای بررسی کمبود آب فقط به گذشته بسنده نشد و با استفاده از روش LSTM مقدار آن برای ۲۰ سال آینده نیز تخمین زده شد. هم‌چنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت عوامل مؤثر بر این شاخص کمبود آب، تغییرات آب و هوایی که با عنوان تغییر اقلیم یاد می‌شود، محاسبه شد. از آن جایی که انتظار می‌رود تغییر اقلیم بر روی میزان عرضه و تقاضای آب تأثیرگذار باشد، دما و بارش ۲۰ سال آینده شهر یزد با استفاده از گزارش ششم IPCC که جدیدترین گزارش تغییر اقلیمی است، پیش‌بینی گردید و احتمال وقوع شرایط مختلف در شاخص کمبود آب با توجه به تغییرات دما و بارش مورد محاسبه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی کمبود آب، با ترکیب میزان عرضه و تقاضای آب، شاخص کمبود آب تعریف گردید. سپس از داده‌های ماهانه مربوط به عرضه و تقاضای آب در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ برای پیش‌بینی میزان کمبود آب در ۲۰ سال آینده استفاده شد. برای این کار از روش شبکه عصبی عمیق LSTM استفاده شد. سپس تأثیر تغییر اقلیم بر روی کمبود آب مورد بررسی قرار گرفت. جهت پیش‌بینی دما و بارش آینده از گزارش ششم IPCC و مدل HadGem3-GC31-LL استفاده شد و دما و بارش ۲۰ سال آینده تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 استخراج شد. این سناریوها به ترتیب حالت خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه را در تغییر آب و هوا در نظر می‌گیرند. در نهایت با استفاده از احتمال شرطی احتمال وقوع شرایط مختلف آب و هوایی و کمبود آب محاسبه شد.

منطقه مورد مطالعه

شهر یزد بین عرض جغرافیایی "۳۸ '۵۶ °۳۱ تا "۵۶ '۴۸ °۳۱ شمالی و طول جغرافیایی "۱۰ '۱۶ °۵۴ تا "۱۶ '۲۴ °۵۴ شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. این شهر با وسعتی در حدود 99/5 کیلومتر مربع، در مرکز استان یزد در مسیر راه اصفهان به کرمان واقع شده است [18]. ارتفاع این شهر به طور متوسط ۱۲۱۵ متر از سطح دریاست و در جهت شمال غرب به جنوب شرق کشیده شده است. از آنجایی که این شهر در مجاورت کویر مرکزی ایران واقع شده است دارای آب و هوای گرم و خشک است. میانگین بارندگی بسیار کم و در حدود ۶۰ میلی‌متر در سال است. در مقابل میزان تبخیر بسیار زیاد است و حدودا ۴ متر در سال است [19]. آب‌های زیرزمینی موجود در منطقه برای تأمین آب شهر کافی نیستند و این امر مدیران منطقه را بر آن داشت تا از روش‌های دیگری نیز در کنار استفاده از آب زیرزمینی برای تأمین آب مورد نیاز شهر استفاده کنند. طرح انتقال آب از زاینده‌رود به شهر یزد، در سال ۱۳۷۸ به بهره‌برداری رسید. تخصیص اولیه آن ۷۸ میلیون مترمکعب در سال بود که در سال ۱۳۸۳ به ۹۸ میلیون مترمکعب افزایش یافت و هدف، تأمین بخشی از آب مورد نیاز شهرهای یزد، میبد و اردکان بود [20]. خط دوم انتقال آب نیز از بهشت آباد به یزد، با هدف تأمین آب شرب شهر در سال ۱۳۹۲ آغاز شد. با اجرای این طرح، آب به طور مستقیم از حوضه کارون به استان وارد می‌شود. اما این طرح تا به حال پیشرفت زیادی نداشته و هنوز به مرحله بهره‌برداری نرسیده است [21]. از جمله اقدامات دیگر جهت کاهش مصرف آب، جمع‌آوری فاضلاب شهری و تصفیه آن و استفاده مجدد جهت آبیاری فضای سبز شهری بود که در سال ۱۳۸۱ با ظرفیت ۷۵ هزار نفر راه‌اندازی شد. آخرین پروژه، شیرین کردن آب خلیج فارس و انتقال آن به کرمان و یزد بود که هدف عمده این پروژه تأمین آب مورد نیاز صنعت و معدن بود و در درجه دوم با ۱۵ میلیون مترمکعب در سال تأمین بخشی از آب شرب شهرهای هرمزگان، کرمان و یزد را به عهده گرفت [22,23].



شکل ۱ منطقه مورد مطالعه

شاخص کمبود آب

برای تجزیه و تحلیل میزان کمبود آب باید عرضه و تقاضای آب به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد. منظور از تقاضای آب، مصرف آب شهر است. منظور از عرضه آب نیز مقدار آب تأمین شده از منابع مختلف شامل آب‌های زیرزمینی و انتقالی است. مصرف و تأمین آب شهر یزد از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ به صورت ماهانه از شرکت آب و فاضلاب شهرستان یزد تهیه شد. بدین منظور شاخص کمبود آب به صورت زیر تعریف گردید. در صورتی که مقدار این شاخص منفی باشد، نشان دهنده بیشتر بودن میزان تقاضا نسبت به عرضه است. در این صورت شهر با بحران تأمین آب مواجه خواهد شد.

$$SI = \frac{Supply_{water} - Demand_{water}}{Supply_{water}} * 100 \qquad (۱)$$

روش LSTM

پیش‌بینی سری زمانی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی حافظه بلند مدت (LSTM) یکی از تکنیک‌های پیشرفته و کارآمد در تحلیل داده‌های زمانی است. این روش نوع خاصی از شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) هستند که برای یادگیری روابط بلندمدت در داده‌های سری زمانی طراحی شده‌اند [24].

STM توسط Schmidhuber در سال ۱۹۹۷ معرفی شد تا بر مشکلات RNNهای استاندارد در یادگیری روابط بلندمدت غلبه کند. RNNها به دلیل اثر محو شدن یا انفجار گرادیان‌ها در فرایند آموزش، در یادگیری روابط بلندمدت دچار مشکل می‌شوند [25]. LSTM با معرفی ساختاری خاص به نام «سلول حافظه» این مشکل را حل می‌کند و یک واحد LSTM شامل چندین بخش اصلی است:

۱. سلول حافظه: اطلاعات را در طول زمان ذخیره می‌کند.

۲. دروازه فراموشی (Forget Gate): تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از اطلاعات قبلی را فراموش کند.

۳. دروازه ورودی (Input Gate): تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از اطلاعات جدید به سلول حافظه اضافه شود.

۴. دروازه خروجی (Output Gate): تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از اطلاعات سلول حافظه به عنوان خروجی استفاده شود.

این دروازه‌ها از سیگموئید و تانژانت هایپربولیک به عنوان توابع فعال‌سازی استفاده می‌کنند که مقدار آن‌ها بین صفر و یک قرار دارد [26].

طبق این روابط ورودی X_t در زمان t به صورت انتخابی در سلول C_t که توسط دروازه ورودی انتخاب شده است، ذخیره می‌شود. وضعیت آخرین لحظه سلول C_{t-1} به صورت انتخابی توسط دروازه فراموشی فراموش می‌شود. سرانجام دروازه خروجی کنترل می‌کند که چه بخشی از سلول C_t به خروجی h_t اضافه شود. حال اگر I_t را به عنوان دروازه ورودی و F_t را به عنوان دروازه فراموشی در نظر بگیریم. مقدار به روز شده وضعیت دروازه C_t به صورت زیر خواهد بود [27].

$$Ct = F_t * C_t - 1 + It * (relu(W_c * [O_t - 1, X_t] + b_c \qquad (۲)$$

$$It = \sigma(W_i * [O_t - 1, X_t] + b_i) \qquad (۳)$$

$$Ft = \sigma(W_f * [O_t - 1, X_t] + b_f) \qquad (۴)$$

که در آن W_i, W_f, W_c ماتریس وزنی هستند، O_{t-1} خروجی سلول قبلی است، X_t ورودی، b_i, b_f, b_c بردارهای بایاس هستند.

خروجی نهایی O_t به صورت زیر به دست می‌آید.

$$Ot = \sigma_t * Relu(C_t) \qquad (۵)$$

ReLU (Rectified Linear Unit) یک تابع فعال‌سازی است که به صورت زیر عمل می‌کند:

$$Relu = Max(0, x) \qquad (۶)$$

این تابع باعث می‌شود مقادیر منفی ورودی به صفر تبدیل شوند و تنها مقادیر مثبت حفظ شوند. در شبکه‌های عصبی، ReLU به دلیل رفتار ساده و عدم ایجاد مشکل اشباع در مقایسه با توابع سیگموئیدی یا هایپربولیک بسیار پرکاربرد است [27].

در این مطالعه جهت بهینه‌سازی نیز از الگوریتم Adam (Adaptive Moment Estimation) استفاده گردید. الگوریتم Adam (Adaptive Moment Estimation) یک روش بهینه‌سازی پرکاربرد در شبکه‌های عصبی است که ترکیبی از دو الگوریتم‌های Momentum و RMSProp را ارائه می‌دهد. هدف اصلی این الگوریتم بهینه‌سازی سرعت همگرایی و دقت در پیدا کردن نقطه بهینه است Adam. به ویژه در مسائلی که داده‌های متنوع و نویز زیادی دارند، بسیار کارآمد است [28].

جهت پیش‌بینی سری زمانی با LSTM در ابتدا داده‌ها نرمال‌سازی شدند یعنی داده‌ها به یک بازه مشخص مانند [۰, ۱] تبدیل شد تا آموزش مدل کارآمدتر شود. سپس داده‌ها به دو مجموعه آموزش و آزمون تقسیم شدند. ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش

و ۲۰٪ برای آزمایش در نظر گرفته شدند [29].

برای ساخت و آموزش مدل از کتابخانه‌هایی مانند TensorFlow یا Keras استفاده گردید. سپس مدل LSTM تعریف شد. این مدل شامل لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی است [30]. سپس تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه، نرخ یادگیری، و تابع خسارت مانند MSE تعیین شد. در نهایت مدل با استفاده از داده‌های آموزشی آزمایش شد و با معیارهایی مانند RMSE، MAE دقت مدل محاسبه گردید. سپس با استفاده از مدل آموزش دیده، برای آینده پیش‌بینی‌هایی صورت گرفت.

سناریوهای تغییر اقلیم

جهت پیش‌بینی دما و بارش ۳۰ سال آینده از گزارش ششم هیئت بین‌المللی تغییرات اقلیمی (IPCC) که به نام «گزارش ارزیابی ششم (AR6)» شناخته می‌شود، استفاده شد. همچنین از خروجی مدل HadGEM3-GC31-LL که یکی از مدل‌های پیشرفته اقلیمی است و توسط دفتر هواشناسی بریتانیا(Met Office) توسعه یافته است، استفاده شد. این مدل بخشی از خانواده مدل‌های Hadley Centre Global Environment Model (HadGEM) است و برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی اثرات آن بر سیستم‌های مختلف زمین استفاده می‌شود. HadGEM3-GC31-LL به دلیل رزولوشن بالا و تعاملات پیچیده بین اجزای مختلف مدل، دقت بالایی در شبیه‌سازی پدیده‌های اقلیمی مختلف دارد. همچنین توانایی شبیه‌سازی دقیق تعاملات بین جو، اقیانوس، یخ دریا و سطح زمین را دارد که به درک بهتر فرایندهای اقلیمی کمک می‌کند [31]. مدل HadGEM3-GC31-LL به طور مستمر به‌روزرسانی می‌شود تا شامل داده‌ها و فرضیات جدید علمی باشد، که این امر به دقت و قابلیت اطمینان مدل می‌افزاید. در مجموع، مدل HadGEM3-GC31-LL یکی از ابزارهای کلیدی در تحقیقات اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی است که به محققان کمک می‌کند تا تأثیرات بلندمدت تغییراقلیم را بهتر درک و مدیریت کنند [32,33].

اکنون در گزارش ارزیابی ششم (Assessment Report (AR6) IPCC گروه جدیدی از سناریوهای انتشار به نام سناریوهای SSP (Shared Socio- Economic Pathways) ارائه شده است. این سناریوها برای بررسی تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیاست‌های مختلف در مقابله با تغییرات اقلیمی استفاده می‌شوند.

SSP1-2.6 (SSP126): این سناریو نشان‌دهنده یک مسیر با سطح پایین انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این مسیر به دنبال اهداف پایداری بالا، کاهش نابرابری‌ها و همکاری‌های بین‌المللی قوی است. در این سناریو، تغییرات اقلیمی تا حد ممکن کاهش می‌یابد [34].

SSP2-4.5 (SSP245): این سناریو یک مسیر میانه را با انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهد. در این مسیر، روندهای اجتماعی و اقتصادی فعلی با بهبودهای تدریجی در تکنولوژی و سیاست‌های زیست‌محیطی ادامه می‌یابد [35].

SSP5-8.5 (SSP585): این سناریو نمایانگر یک مسیر با سطح بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این مسیر بر اساس رشد اقتصادی سریع و اتکای زیاد به سوخت‌های فسیلی پیش می‌رود و به عنوان یک سناریوی بسیار بدبینانه برای تغییرات اقلیمی در نظر گرفته می‌شود [36].

این سناریوها به محققان و سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا تأثیرات احتمالی سیاست‌های مختلف را بر تغییرات اقلیمی و اقدامات کاهش و سازگاری بهتر درک کنند و برنامه‌های مؤثرتری برای مقابله با چالش‌های اقلیمی ایجاد کنند.

بعد از استخراج پیش‌بینی‌های اقلیمی نوبت به ریزمقیاس‌سازی می‌شود. در این تحقیق از مدل Lars-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی (Downscaling) داده‌های مدل گردش عمومی استفاده شده است. دلیل این موضوع این است که دقت GCM ها به دلیل محدودیت‌های مدل‌سازی آن‌ها در مقیاس‌های محلی کافی نیست. GCMها معمولا نمی‌توانند پدیده‌های کوچک مقیاس مانند تغییرات محلی آب و هوا را به خوبی شبیه‌سازی کنند. ریزمقیاس‌نمایی، خطاها و سوگیری‌های موجود در داده‌های GCM را اصلاح می‌کند و به ما امکان می‌دهد تا نتایج مطالعات را با مشاهدات واقعی بهتر تطبیق دهیم. در نتیجه، GCMها بدون انجام فرایند ریزمقیاس‌نمایی قادر به ارائه اطلاعات قابل اعتماد از دما و بارش در مقیاس محلی نیستند [37]. در این تحقیق از مدل Lars-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی داده مدل گردش عمومی استفاده شده است.

احتمال شرطی

احتمال شرطی (Conditional Probability) مفهومی در نظریه احتمالات است که به بررسی احتمال وقوع یک رویداد به شرط وقوع رویداد دیگری می‌پردازد [38]. این مفهوم کمک می‌کند تا روابط بین رویدادها بهتر درک شود و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری انجام شود. احتمال شرطی در مسائل مربوط به مدیریت و تأمین آب شهری، به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاربردهای زیادی دارد [39]. به عنوان مثال پیش‌بینی منابع آب به شرط وقوع پدیده ال‌نینو، مدیریت عرضه و تقاضای آب به خصوص در تابستان و یا تحلیل ریسک خشکسالی [40-42]. احتمال شرطی بین سه متغیر این امکان را می‌دهد تا روابط پیچیده بین عوامل مختلف ارزیابی شده و تحلیل‌های دقیق‌تری انجام شود. در زمینه مدیریت منابع آب، این تحلیل‌ها می‌توانند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک کمک کنند. با استفاده از این مفهوم، می‌توان تأثیرات تغییرات آب و هوایی و سایر عوامل محیطی را بر منابع آب بهتر پیش‌بینی کرد [43].

در این مطالعه سه متغیر تصادفی دما، بارش و شاخص کمبود آب در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از شرایط مختلف آب و هوایی و شاخص کمبود آب، سناریوهایی تدوین گردید و احتمال وقوع هر سناریو با استفاده از احتمال شرطی محاسبه شد.

$$P(WSI|P,T) = \frac{P(WSI \cap P \cap T)}{P(P \cap T)} \quad (۷)$$

که در این رابطه WSI: شاخص کمبود آب، P: بارش و T: دما است.

شاخص‌های ارزیابی

MSE (Mean Squared Error) MSE یا Mean Squared Error (میانگین مربعات خطا) یک معیار ارزیابی برای مدل‌های رگرسیونی و پیش‌بینی است که میزان تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده را محاسبه می‌کند. این معیار به صورت میانگین مربع اختلافات بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تعریف می‌شود [44].

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2 \quad (۸)$$

MSE همیشه عددی غیرمنفی است، زیرا اختلاف‌ها به توان دو رسیده‌اند و نمی‌توانند منفی باشند. هر چقدر MSE کوچک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی بهتری انجام داده است. مقدار صفر برای MSEبه معنای پیش‌بینی کاملا دقیق و بدون خطاست.

با این حال، بازه دقیق مناسب بودن MSE بستگی به مقیاس داده‌ها و حوزه کاری دارد. برای داده‌هایی با مقادیر بزرگ، MSE بزرگ‌تری نیز ممکن است مناسب باشد. اما به طور کلی، هر چقدر MSE کمتر باشد، مدل عملکرد بهتری دارد.

MAE (Mean Absolute Error) این معیار میانگین قدر مطلق اختلافات بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده را محاسبه می‌کند. برخلاف MSE که اختلافات را به توان دو می‌رساند، MAE صرفا از قدر مطلق این اختلافات استفاده می‌کند و به همین دلیل، کمتر به خطاهای بزرگ حساس است [45].

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|O_i - P_i| \quad (۹)$$

MAE همیشه مقداری غیرمنفی دارد، زیرا از قدر مطلق استفاده می‌کند. مانند MSE، هر چقدر MAE کوچک‌تر باشد، مدل دقیق‌تر است. نسبت به خطاهای بزرگ حساسیت کمتری دارد، زیرا خطاها به توان دو نمی‌رسند.

MAPE (Mean Absolute Percentage Error) MAPE یک معیار ارزیابی برای مدل‌های پیش‌بینی است که درصد خطای پیش‌بینی نسبت به مقدار واقعی را به صورت میانگین محاسبه می‌کند. این معیار اجازه می‌دهد تا خطاها را به صورت نسبی (درصدی) ارزیابی کنید، که آن را به ویژه برای داده‌هایی با مقیاس‌های متفاوت مفید می‌سازد [46].

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{O_i - P_i}{O_i}\right| \quad (۱۰)$$

MAPE نشان می‌دهد که به طور میانگین پیش‌بینی‌ها چه درصدی از مقدار واقعی فاصله دارند. چون این معیار به درصد بیان می‌شود، امکان مقایسه خطاها در داده‌هایی با مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌سازد.

MAPE معمولا بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ است، هر چه MAPE کوچک‌تر باشد، پیش‌بینی دقیق‌تر است. به طور کلی، MAPE

کمتر از ۱۰٪ به عنوان پیش‌بینی بسیار خوب در نظر گرفته می‌شود، بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ معمولا خوب است، و ۲۰٪ تا ۵۰٪ می‌تواند قابل قبول باشد، اما بیش از ۵۰٪ به عنوان عملکرد ضعیف مدل تلقی می‌شود.

RMSE (Root Mean Square Error). این معیار، میزان خطای پیش‌بینی مدل را به صورت ریشه دوم میانگین مربعات اختلافات بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده محاسبه می‌کند. RMSE به دلیل استفاده از مربع اختلافات، حساسیت بیشتری به خطاهای بزرگ دارد [47].

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2} \quad (۱۱)$$

NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency). NSE یک معیار ارزیابی برای مدل‌های هیدرولوژیکی و دیگر مدل‌های پیش‌بینی است که عملکرد مدل را در پیش‌بینی مقادیر مشاهده شده ارزیابی می‌کند. NSEبه بررسی میزان تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده نسبت به مقادیر متوسط‌مشاهده شده می‌پردازد [48].

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۲)$$

NSE = 1 نشان‌دهنده یک مدل کامل و ایدئال است. NSE بین ۰ تا ۱ به معنای عملکرد قابل قبول مدل است. به طور کلی، هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی دقیق‌تری دارد. NSE منفی نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی‌ها عملکرد ضعیفی داشته و استفاده از میانگین داده‌ها نتایج بهتری خواهد داشت.

در تمام این روابط O: مقدار مشاهداتی، P: مقدار پیش‌بینی شده، n: تعداد نمونه‌ها و $\bar{O}$: میانگین مقادیر مشاهداتی است.

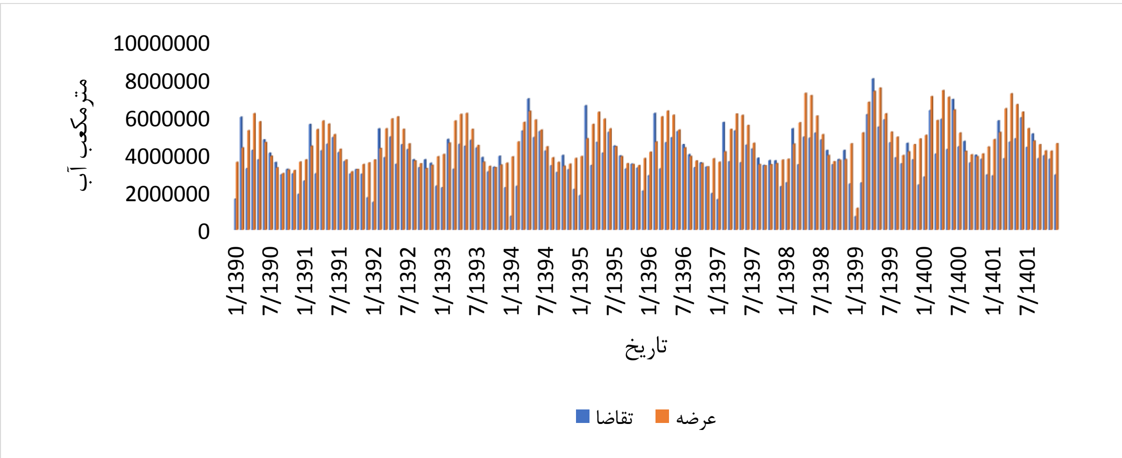
نتایج

محاسبه شاخص کمبود آب

همان طور که گفته شد برای محاسبه شاخص کمبود آب نیاز به مقدار عرضه و تقاضاست. در این مطالعه از عرضه و تقاضای ماهانه سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ شهر یزد استفاده شد. مقادیر استفاده شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای آشنایی بیشتر با داده‌های عرضه و تقاضای آب شهر یزد، خصوصیات آماری این مقادیر در جدول (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است مقدار حداکثر تقاضای آب از عرضه بیشتر است که نشان دهنده کمبود آب در برخی مواقع در این شهر است. اما بیشتر بودن میانگین عرضه نسبت به تقاضا نشان می‌دهد که مدیران و مسئولان شهر در تلاشند به روش‌های گوناگون آب مورد نیاز را تأمین کنند.

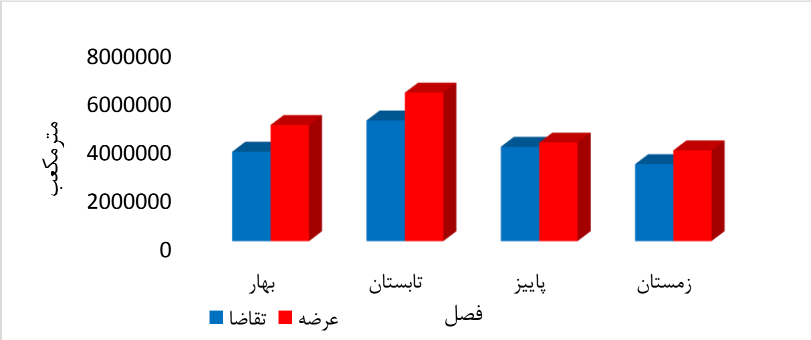
از آنجایی که انتظار می‌رفت دما بر میزان مصرف آب تأثیرگذار باشد و برای تحلیل بهتر مقادیر، میانگین عرضه و تقاضای آب به صورت فصلی نیز محاسبه شد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲ مجموع عرضه و تقاضای ماهانه

جدول ۱ خصوصیات آماری داده‌های عرضه و تقاضا

	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانه	میانگین
عرضه آب (میلیون مترمکعب)	۱,۱۸	۷,۵۳	۱,۱۵۳	۴,۴۸	۴,۶۹
تقاضای آب (میلیون مترمکعب)	۱,۲۴	۸,۰۱	۰,۷۱	۳,۸۳	۳,۹۴

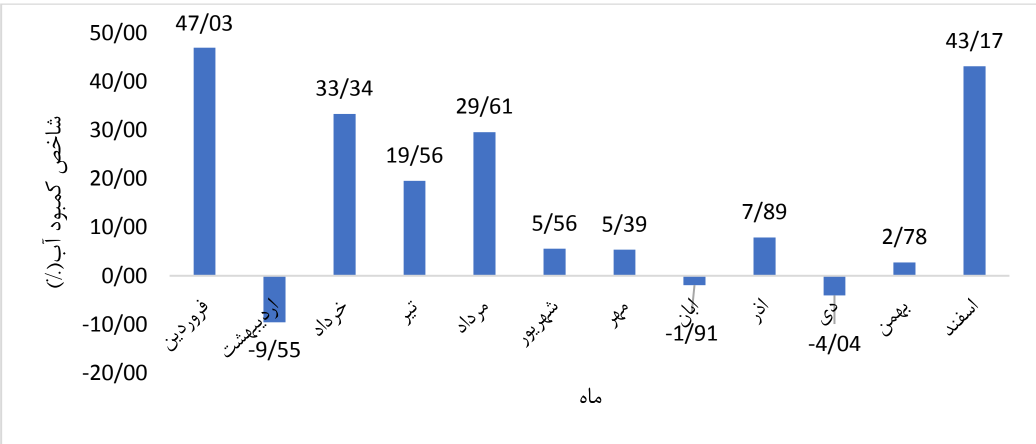


شکل ۳ میانگین عرضه و تقاضای آب فصلی

همان طور که در شکل (۳) مشخص است میزان عرضه و تقاضا در فصل تابستان بیش از سایر فصل‌هاست. بعد از آن فصل بهار و پاییز و در نهایت فصل زمستان دارای کمترین مقدار است. با توجه به مصرف متوسط آب در بهار، اگر فصل بهار را به عنوان مبنا در نظر بگیریم. میزان تقاضای آب در فصل تابستان ۳۵٪ بیشتر از فصل بهار است. مقدار عرضه آب نیز در تابستان ۲۸٪ بیشتر از فصل بهار است. فصل زمستان نیز به عنوان فصلی با کمترین میزان مصرف، مقدار مصرف آب در زمستان ۱۴٪ کمتر از فصل بهار است و مقدار عرضه آب در زمستان ۲۲٪ بیشتر از فصل بهار است.

سپس با استفاده از مقادیر عرضه و تقاضا شاخص کمبود آب محاسبه گردید که میانگین ماهانه آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان طور که مشخص است در برخی از ماه‌ها میانگین شاخص کمبود آب منفی شده است که بدین معناست که در این ماه‌ها میانگین تقاضا بیشتر از عرضه شده است. این اتفاق در ماه‌های دی، اردیبهشت و آبان افتاده است. بیشترین میزان شاخص نیز مربوط به ماه‌های اسفند، فروردین و خرداد است. همان طور که مشاهده شد در فصل تابستان میزان تقاضا بیشتر از سایر فصل‌هاست اما مثبت بودن شاخص کمبود آب نشان می‌دهد که مدیران منطقه همواره تلاش کرده‌اند در فصل تابستان آب مورد نیاز را عرضه کنند تا از ایجاد مشکل برای مصرف کنندگان در تابستان به خصوص در شهر یزد که تابستان با دمای هوای بالایی روبه‌روست و کمبود آب می‌تواند باعث مشکلات زیادی برای مردم شود، جلوگیری کنند.



شکل ۴ میانگین ماهانه شاخص کمبود آب

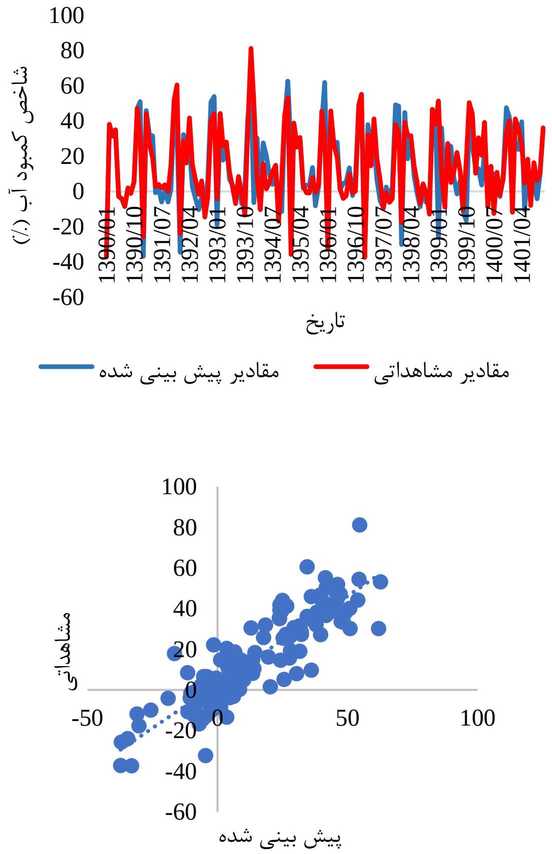
پیش‌بینی سری زمانی شاخص کمبود آب با روش LSTM

برای پیش‌بینی سری زمانی شاخص کمبود آب در ۲۰ سال آینده به صورت ماهانه از روش LSTM استفاده شد. این روش یکی از روش‌های هوش مصنوعی یادگیری عمیق است که در مطالعات مختلف و برای پیش‌بینی مسائل مختلف از آن استفاده شده است. در این روش از تابع فعالساز Relu (Rectified Linear Unit) استفاده گردید، همچنین جهت بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی Adam (Adaptive Moment Estimation) استفاده شد. برای آموزش مدل از داده‌های شاخص کمبود آب ماهانه مربوط به سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. ۸۰٪ داده‌ها به عنوان آموزش و ۲۰٪ برای آزمایش استفاده شد. در شکل (۵) نمودار نقطه‌ای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

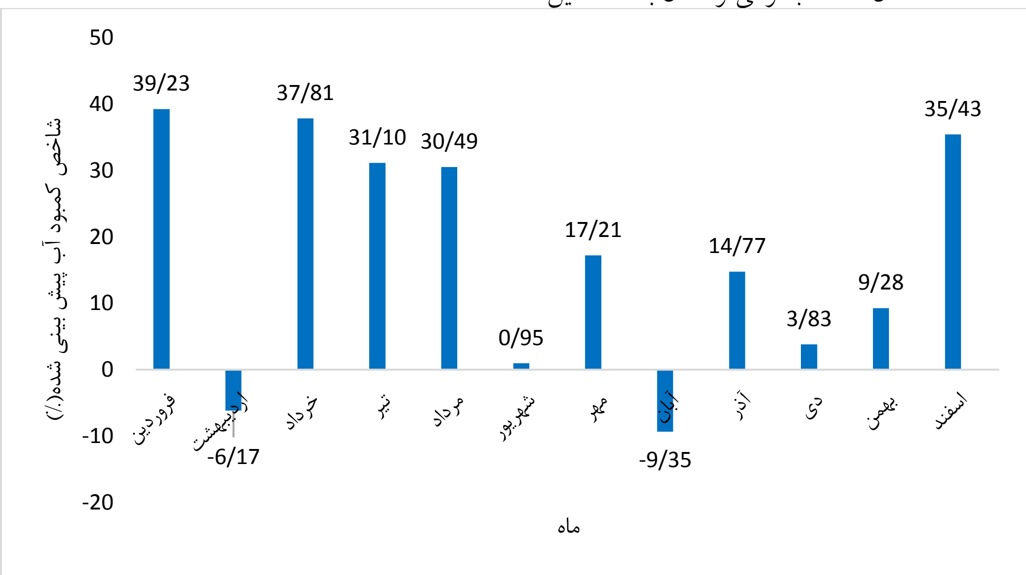
دقت پیش‌بینی انجام شده در جدول (۲) نشان داده شده است. همان طور که در جدول مشخص است دقت مدل قابل قبول است.

در شکل (۶) میانگین ماهانه شاخص کمبود آب پیش‌بینی شده برای ۲۰ سال آینده نشان داده شده است. همان طور که در شکل نیز نشان داده شده است در مقادیر پیش‌بینی شده نیز ماه‌های اردیبهشت و آبان دارای شاخص کمبود آب منفی هستند که نشان دهنده بیشتر بودن مقدار تقاضا نسبت به عرضه است.

مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر تاریخی در ماه‌های فروردین، شهریور، آبان و اسفند به ترتیب ۷٫۸، ۴٫۶، ۷٫۴ و ۷٫۷۵ واحد کمتر شده است که نشان دهنده بحرانی‌تر شدن بحث تأمین آب در این ماه‌ها در آینده است. در ماه‌های تیر و مهر بیشترین افزایش را داشته است که این مقدار حدود ۱۱٫۵ واحد است.



شکل ۵ منحنی خطی و اسکاتر پلات مقادیر مشاهداتی و محاسباتی



شکل ۶ شاخص کمبود آب پیش‌بینی شده

پیش‌بینی دما و بارش آینده با سناریوهای تغییر اقلیم

همان طور که مشاهده شد میزان عرضه و تقاضای آب و به دنبال آن شاخص کمبود آب در فصل‌های مختلف متفاوت بود. انتظار می‌رود دما و بارش از جمله عوامل تأثیرگذار بر آن باشد. به همین دلیل در کنار پیش‌بینی شاخص کمبود آب در آینده، دما و بارش نیز برای ۲۰ سال آینده با استفاده از سناریوهای تغییراقلیم پیش‌بینی گردید. جهت این کار سه سناریوی خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه (SSP126, SSP245, SSP585) در نظر گرفته شد. جهت پیش‌بینی دما و بارش آینده از اطلاعات دما و بارش سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ استفاده گردید. به‌منظور بررسی میزان قابل اعتماد بودن اطلاعات شبیه‌سازی شده از سه شاخص آماری ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی نش ـ ساتکلیف (NSE) استفاده شد. جدول (۳) نتایج واسنجی پارامترهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده NCEP را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است پارامترهای اقلیمی با دقت خوبی پیش‌بینی شده‌اند.

در شکل‌های زیر متوسط دما و بارش ماهانه پیش‌بینی شده در سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۲۲ تحت سه سناریوی مختلف در مقایسه با متوسط دما و بارش دوره گذشته نشان داده شده است.

در مورد دمای حداقل که در شکل (۷) نشان داده شده است. در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، بهمن و اسفند میانگین سالانه دمای حداقل در آینده تحت هر سه سناریو اندکی افزایش خواهد یافت. در ماه تیر دمای حداقل گذشته و آینده در هر سه سناریو تقریبا یکسان است. در باقی ماه‌ها مقدار دمای گذشته با دمای آینده در سناریوی SSP245 تقریبا یکسان خواهد بود و در سناریوی SS126 اندکی کمتر از مقدار گذشته است و در سناریوی SSP585 اندکی بیشتر از متوسط دمای گذشته است. به طور میانگین تغییر سالانه متوسط دمای حداقل در آینده نسبت به گذشته در جدول (۲) نشان داده شده است. همان طور که در جدول مشخص است در سناریوی خوش‌بینانه دمای حداقل ۰٫۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. در سناریوی متوسط ۰٫۸۱ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی بدبینانه ۱٫۲۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت.

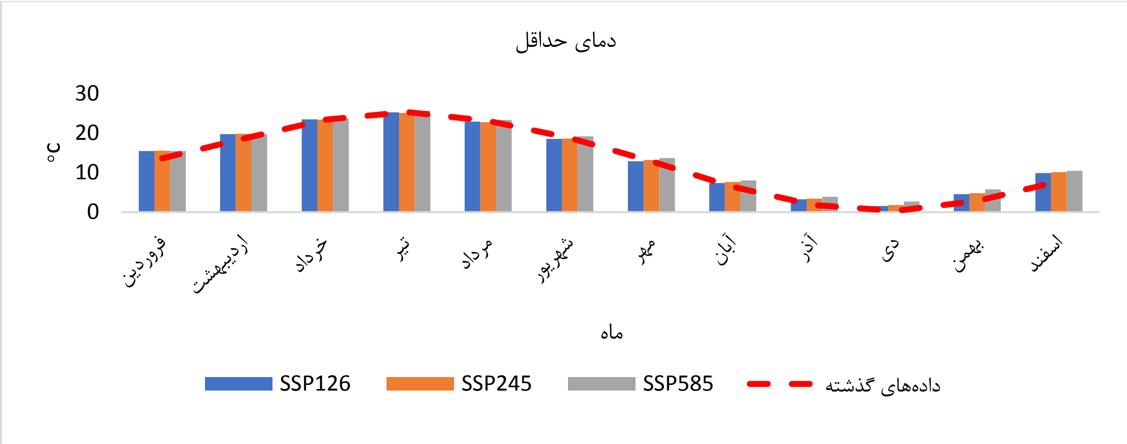
در دمای حداکثر همان طور که در شکل (۸) مشخص است، فقط در ماه دی در سناریوی SSP585 و در ماه‌های مهر، آبان و آذر در سناریوی SSP126 مقدار دمای حداکثر در آینده کاهش خواهد یافت. در باقی ماه‌ها متوسط دمای حداکثر گذشته و آینده تقریبا یکسان خواهد بود. به طور متوسط، میانگین دمای حداکثر سالیانه در سناریوی SSP126 نسبت به گذشته ۰٫۳۴ افزایش خواهد و این افزایش در سناریوی SSP245 و SSP585 به ترتیب ۰٫۱۴ و ۰٫۴۵ خواهد بود.

جدول ۲ دقت پیش‌بینی سری زمانی شاخص کمبود آب با روش LSTM

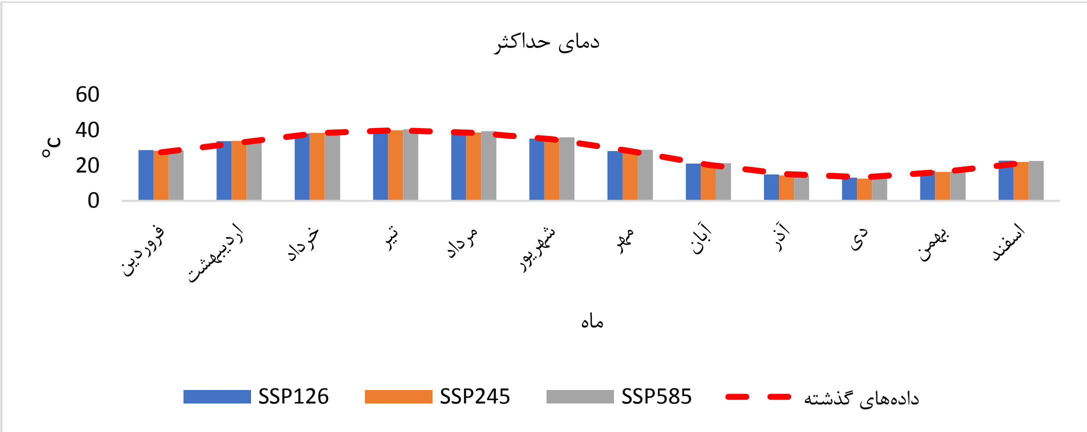
MSE	MAE	MAPE	RMSE	NSE
0.018	0.11	0.32	0.13	0.75

جدول ۳ شاخص‌های خطاسنجی پارامترهای اقلیمی دوره مشاهداتی با شبیه‌سازی شده

پارامتر	واسنجی			
	سال دوره	RMSE	NSE	R^2
دمای حداقل	۱۳۵۸–۱۳۹۲	۰/۱۲۶	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
دمای حداکثر	۱۳۵۸–۱۳۹۲	۰/۱۰۵	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
بارش	۱۳۵۸–۱۳۹۲	۲/۷۵۶	۰/۹۴۶	۰/۹۵۵



شکل ۷ متوسط دمای حداقل ماهانه در دوره آتی (۱۴۰۲-۱۴۲۲) نسبت به مشاهداتی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)



شکل ۸ متوسط دمای حداکثر ماهانه در دوره آتی (۱۴۰۲-۱۴۲۲) نسبت به مشاهداتی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)



شکل ۹ متوسط بارش ماهانه در دوره آتی (۱۴۰۲-۱۴۲۲) نسبت به مشاهداتی (۱۳۵۸-۱۳۹۲)

در مورد بارش وضعیت کاملا متفاوت است و همان طور که در شکل (۹) نیز مشخص است تغییرات زیادی به خصوص در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند در هر سه سناریو پیش‌بینی شده است. این نشان دهنده این است که در سال‌های آینده شهر یزد با افزایش بارش روبه‌رو خواهد شد. هر چند در دو سال اخیر نیز این افزایش بارش به خصوص در فصل بهار مشاهده شده است. به طور متوسط میانگین سالانه بارش در سناریوی SSP126، ۷۷,۷٪ افزایش خواهد داشت. در سناریوی SSP245 این مقدار به ۹۶,۶۹٪ و در سناریوی SSP585، ۹۵,۶۱٪ افزایش خواهد داشت.

با این اوصاف انتظار می‌رود که در آینده مشکل کمبود آب این منطقه کمرنگ‌تر خواهد شد. هر چند که در سال‌های اخیر این منطقه با خشکسالی مواجه بوده است و مدیران را بر آن داشت تا برای تأمین آب منطقه برداشت آب‌های زیرزمینی و انتقال آب را افزایش دهند. اما همان طور که افزایش بارش پیش‌بینی شده است عوامل اجتماعی مانند افزایش جمعیت هم می‌توانند بر میزان کمبود آب تأثیرگذار باشند. لذا تنها در نظر گرفتن افزایش بارش خوش‌بینانه است و جهت انجام برنامه‌ریزی دقیق‌تر جهت تأمین آب سایر عوامل مؤثر بر این موضوع نیز باید در نظر گرفته شود.

تحلیل سناریوهای احتمالی

همان طور که در بخش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفت. مقدار دما، بارش و شاخص کمبود آب در آینده با تغییراتی مواجه است اما محاسبه احتمال وقوع وضعیت‌های مختلف مشخص نیست. به عنوان مثال شرایط کاهش دما، افزایش بارش و کاهش شاخص کمبود آب برای منطقه شرایط بسیار مطلوبی است که با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده احتمال دارد اتفاق بیفتد اما این احتمال چه اندازه است و تصمیم‌گیرندگان منطقه تا چه حد می‌توانند به این موضوع امیدوار باشند. در واقع این موضوع از جمله عدم قطعیت‌های محاسبه شاخص کمبود آب در آینده است.

با استفاده از احتمال شرطی می‌توان احتمال وقوع شرایط مختلف را محاسبه کرد. جهت محاسبه این احتمالات دمای میانگین و بارش در هر سه سناریو به سه دسته کم، متوسط و زیاد تقسیم شد. این کار برای شاخص کمبود آب پیش‌بینی شده برای آینده نیز انجام گرفت. این تقسیم‌بندی بدین صورت انجام گرفت که در ابتدا میانگین بارش و شاخص کمبود آب در گذشته محاسبه شد. برای بارش و شاخص کمبود آب، ۰,۲۵ برابر میانگین کمتر از این مقدار به عنوان حد پایین و ۰,۲۵ برابر بیشتر از مقدار میانگین به عنوان حد بالا در نظر گرفته شد. در مورد دما به دلیل تغییرات کم دما در آینده، میزان تغییرات میانگین در آینده که در جدول (۴) نشان داده شده است، در نظر گرفته شد. بدین صورت که میانگین دمای گذشته به عنوان حد پایین و میانگین دمای گذشته به اضافه مقدار تغییر دمای نشان داده شده در جدول (۴) به عنوان حد بالا در نظر گرفته شد.

سپس تمام مقادیر بین حد پایین و بالا به عنوان دسته متوسط در نظر گرفته شد. در مورد دما و بارش مقادیر کمتر از حد پایین به عنوان دسته کم و بیشتر از حد بالا با عنوان دسته زیاد در نظر گرفته شد. در شاخص کمبود آب، مقادیر کمتر از حد پایین نشان دهنده افزایش تقاضا نسبت به تأمین آب است که باعث افزایش کمبود آب می‌شود. بنابراین به عنوان دسته زیاد در نظر گرفته شده و بیشتر از حد بالا با عنوان دسته کم در نظر گرفته شد. سپس احتمال وقوع ترکیب حالت‌های دما، بارش و شاخص کمبود آب محاسبه شد. در هر سناریوی تغییر اقلیمی ۲۷ حالت ممکن است اتفاق بیفتد که در جدول (۵)، (۶) و (۷) احتمال وقوع هر کدام نشان داده شده است.

جدول ۴ تغییرات متوسط سالانه دمای حداقل و حداکثر و بارش نسبت به دوره آینده

پارامتر	داده‌های تاریخی (۱۳۵۸–۱۳۹۲)	دوره پیش‌بینی	HadGEM3-GC31-LL SSP126	SSP245	SSP585
میانگین سالانه دمای حداقل (°C)	13.08	۱۴۰۲-۱۴۲۲	13.78	13.89	14.34
			+0.7	+0.81	+1.26
میانگین سالانه دمای حداکثر (°C)	27.36	۱۴۰۲-۱۴۲۲	27.7	27.5	27.81
			+0.34	+0.14	+0.45
میانگین سالانه بارش (mm)	55.68	۱۴۰۲-۱۴۲۲	98.95	109.52	108.92
			+77.70%	+96.69%	+95.61%

جدول ۵ محاسبه احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی SSP126

بارش	دمای میانگین	کمبود آب		
		کم	متوسط	زیاد
زیاد	کم	0.297	0.27	0.432
زیاد	متوسط	1	0	0
زیاد	زیاد	0.3	0	0.7
متوسط	کم	0.143	0	0.857
متوسط	زیاد	0.6	0	0.4
کم	کم	0.087	0.391	0.521
کم	متوسط	0.75	0. 25	٠
کم	زیاد	0.67	0	0.34

در جدول (۵) احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی تغییر اقلیم SSP126 نشان داده شده است. سناریوی خطرناک برای شهر بارش کم، دمای زیاد و کمبود آب زیاد است که احتمال وقوع آن ۰٫۳۴ است. اگر چه این احتمال زیاد نیست اما همین احتمال کم نیز باید باعث شود که مسئولان شهر آگاهانه‌تر رفتار کنند. سناریوی خوشایند برای شهر نیز که شامل بارش زیاد، دمای کم و کمبود آب کم است نیز دارای احتمال ۰٫۲۹۷ است که نشان می‌دهد نمی‌توان به این قضیه امیدوار بود و حتما باید مدیریت خوبی جهت مصرف و تأمین آب صورت گیرد.

جدول ۶ محاسبه احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی SSP245

بارش	دمای میانگین	کمبود آب		
		کم	متوسط	زیاد
زیاد	کم	0.302	0.263	0.434
زیاد	متوسط	1	0	0
زیاد	زیاد	0.3	0	0.7
متوسط	کم	0	0	1
متوسط	زیاد	0.5	0	0.5
کم	کم	0.14	0.34	0.52
کم	متوسط	0.571	0.428	0
کم	زیاد	0.653	0.021	0.326

در حالات وقوع مختلف تحت سناریوی تغییر اقلیم SSP245 نیز که در جدول (۶) نشان داده شده است. احتمال وقوع بحرانی شدن شاخص کمبود آب در حالت‌های مختلف بیشتر شده است.

جدول ۷ محاسبه احتمال وقوع حالات مختلف تحت سناریوی SSP585

بارش	دمای میانگین	کمبود آب		
		کم	متوسط	زیاد
زیاد	کم	0.291	0.251	0.458
زیاد	متوسط	0.6	0.4	0
زیاد	زیاد	0.7	0	0.3
متوسط	کم	0.125	0	0.875
متوسط	متوسط	1	0	0
متوسط	زیاد	0.5	0	0.5
کم	کم	0.115	0.257	0.628
کم	متوسط	0.4	0.6	0
کم	زیاد	0.645	0.021	0.334

در سناریوی تغییر اقلیم SSP585 نیز احتمال صفر (عدم وقوع کمبود آب زیاد) بیشتر شده است که با توجه به پیش‌بینی افزایش بارش در SSP585 قابل توجیه است.

در مطالعات آینده می‌توان عوامل تأثیرگذار دیگر بر روی کمبود آب را در نظر گرفت. همچنین می‌توان میزان تأثیر راه‌های مختلف کاهش مصرف و افزایش عرضه آب را بر روی کمبود آب مورد ارزیابی قرار داد.

نتیجه‌گیری

مناطق گرم و خشک به دلیل وجود دمای زیاد و بارش کم همیشه با مشکل کم‌آبی روبه‌رو بوده‌اند و برای تأمین آب مورد نیاز خود از آب زیرزمینی استفاده می‌کردند. در سال‌های اخیر با گسترش شهرنشینی در این مناطق نیاز به آب افزایش یافته و راه‌های دیگری نظیر انتقال آب نیز برای تأمین آب در این مناطق استفاده شده است. شهر یزد از جمله این مناطق است که همیشه تأمین آب یکی از مسائل اساسی آن بوده است. در این مطالعه تلاش شد که کمبود آب و تأثیر آب و هوا بر روی آن هم در گذشته مورد بررسی قرار گیرد و هم برای آینده پیش‌بینی صورت گیرد. بدین منظور شاخص کمبود آب با استفاده از مقادیر ماهانه ۱۲ سال گذشته عرضه و تقاضای آب در شهر محاسبه شد. سپس با استفاده از روش یادگیری عمیق LSTM مقدار این شاخص برای ۲۰ سال آینده پیش‌بینی شد. طبق نتایج فصل تابستان میزان مصرف بیشتر از سایر فصل‌هاست اما تأمین آب همیشه به نحوی صورت گرفته است که در این فصل کمبود آب وجود نداشته باشد تا به دلیل گرمای زیاد هوا در این فصل مردم منطقه با کمبود و قطعی آب مواجه نشوند. بعد از آن دما و بارش آینده با استفاده از گزارش ششم IPCC که جدیدترین گزارش تغییر اقلیم است و با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM3-GC31-LL و با سه سناریوی خوش‌بینانه، بدبینانه و متوسط پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که بارش شهر یزد در آینده افزایش خواهد یافت. برای بررسی دقیق‌تر کم‌آبی در آینده مقدار کم‌آبی به همراه دما و بارش به حالت‌های مختلف تقسیم شد و احتمال وقوع حالات مختلف با احتمال شرطی محاسبه شد. نتایج نشان داد که با وجود افزایش بارش در آینده باز هم احتمال وقوع کم آبی زیاد در آینده بیشتر است. لذا تصمیم‌گیرندگان منطقه باید با هوشیاری بیشتری برای آینده شهر و تأمین آب آن برنامه‌ریزی انجام دهند. این تحقیق بر اساس تنها یک مدل GCM انجام شده است. نتایج بر مبنای مدل‌های GCM دیگر ممکن است متفاوت باشد. لذا برای استفاده‌های کاربردی، در مطالعات آینده، لازم است از نتایج مجموعه‌ای از GCMها استفاده شود و عدم قطعیت نتایج در خصوص مدل‌های GCM در نظر گرفته شود.

واژه‌نامه

دروازه فراموشی	Forget Gate
ریزمقیاس‌نمایی	Down Scaling
دروازه ورودی	Input Gate
دروازه خروجی	Output Gate

سپاسگزاری

مراجع

[1] A. SalehiBaladehi, F. Arabali, and A. Salehi, "The concept and place of water in Iranian culture and Islamic religion and its crystallization in Mazni culture," *Architecture*, vol. 26, no. 6, pp. 26-35, 2023. (In Persian)

[2] M. R. Goodarzi, B. Zahabiyoun, A. R. Massah Bavani, and A. R. Kamal, "Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharesou basin," *Water and Irrigation Management*, vol. 2, no. 1, pp. 25-40, 2012. (In Persian) https://doi.org/10.22059/jwim.2012.25090

[3] V. Sandeep, A. Khandekar, and M. Kumar, "Water supply, urbanization and climate change," *Resilience, Response, and Risk in Water Systems: Shifting Management and Natural Forcings Paradigms*, pp. 195-215, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4668-6_11

[4] M. R. Goodarzi, R. H. Mohtar, R. Piryaei, A. Fatehifar, and M. Niazkar, "Urban WEF Nexus: An Approach for the Use of Internal Resources under Climate Change," *Hydrology*, vol. 9, no. 10, p. 176, 2022. https://doi.org/10.3390/hydrology9100176

[5] F. A. Padder and A. Bashir, "SCARCITY OF WATER IN THE TWENTY-FIRST CENTURY: PROBLEMS AND POTENTIAL REMEDIES," *Medalion Journal: Medical Research, Nursing, Health and Midwife Participation*, vol.

4, no. 1, pp. 1-5, 2023. https://doi.org/10.59733/medalion.v4i1.66

[6] M. TalebiNia and H. Khosravi, "The Relation between Meteorological Drought and Groundwater Quality in Arid and Semi-arid Climate (Case Study: Isfahan Province)," *The Journal of Irrigation and Water Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 269-285, 2020. (In Persian) 10.22125/iwe.2020.114970

[7] M. Goodarzi, M. Sabaghzadeh, and A. Rajabpour niknam, "The Relationship between Land Subsidence and Water Use in Yazd Plain Using Sentinel-1 Images," (in eng), *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, Research vol. 25, no. 76, pp. 0-0, 2025. http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.13

[8] S. Sadeghi, S. Kazemikia, H. Kheirfam, and Z. Hazbavi, "Experiences and consequences of inter-basin water transfer in the world," *Journal of Iran-Water Resources Research (IWRR)*, 2016. (In Persian)

[9] A. R. Bagherieh, I. Loloei, and A. Bagherieh, "Numerical Modeling of Tunnels and Lifelines in Liquefiable Grounds Under Seismic Loading," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 27 ,no. 2, pp. 127-144, 2016. https://doi.org/10.22067/civil.v27i2.33094

[10] M. R. Mansouri Daneshvar, M. Ebrahimi, and H. Nejadsoleymani, "An overview of climate change in Iran: facts and statistics," *Environmental Systems Research*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2019. https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3

[11] M. Goodarzi, A. Fatehifar, and F. Avazpoor, "Bivariate Analysis of the Impact of Climate Change on Drought with SPEI Index and Coppola Functions (Case Study: Dugonbadan), *Iran-Water Resources Research*, vol. 15, no. 4, pp. 352-365, 2019. (In Persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.4.24.7

[12] O. Bozorg-Haddad, B. Zolghadr-Asli, P. Sarzaeim, M. Aboutalebi, X. Chu, and H. A. Loáiciga, "Evaluation of water shortage crisis in the Middle East and possible remedies," *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, vol. 69, no. 1, pp. 85-98, 2020. https://doi.org/10.2166/aqua.2019.049

[13] M. BahmaniBohlooli ,M. MousaviHaghighi, and S. Mousavi, "Investigation And Analysis Of Trend of Urban Green Space Water Consumption And Municipal Water Scarcity Using System Dynamics Approach (Case study: Zarghan city)," *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, vol. 51, no. 3, pp. 551-564, 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22059/ijaedr.2020.278023.668732

[14] Q. V. Dau, K. Kuntiyawichai, and A. J. Adeloye, "Future changes in water availability due to climate change projections for Huong Basin, Vietnam," *Environmental Processes*, vol. 8, pp. 77-98, 2021. https://doi.org/10.1007/s40710-020-00475-y

[15] H. Heidari, M. Arabi, T. Warziniack, and S. Sharvelle, "Effects of urban development patterns on municipal water shortage," *Frontiers in Water*, vol. 3, p. 694817, 2021. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.694817

[16] M. Tabesh, M. MollaRamezani, A. Shorzad, and N. RasiFaghih, "Long-Term Prediction of Domestic Water Demand Using Bayesian Belief Networks," *Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 52.2, no. 107, pp. 47-56, 2022. (In Persian) https://doi.org/10.22034/jcee.2021.31917.1763

[17] Z. GhafariMoghadam and A. SardarShahraki, "Prediction of monthly consumption of drinking water in the Sistan region under climate change impact," *Journal of Natural Environmental Hazards (JNEH),* vol. 12, no. 37, pp. 75-100, 2023. (In Persian) https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42994.1912

[18] S. Sadati, F. Rostami, and H. Fami, "Sustainable management of water resources in Yazd province: challenges and solutions," Journal of Agricultural Technology, 2010.

[19] M. Goodarzi, M. Sabaghzadeh, and A. Rajabpour niknam, "The Relationship between Land Subsidence and Water Use in Yazd Plain Using Sentinel-1 Images," *Journal of Applied Research in Geographical Sciences,* Research vol. 25, no. 76, pp. 0-0, 2025. (In Persian) http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.13

[20] A. Karimi, M. R. Nikoo, R. Karachian, and E. Shirangi, "Assessment of water transport projects impact on long term water supply in Zayandehrud basin by multi-period optimization analysis," *Iranian Water Researches Journal,* vol. 6, no. 2, pp. 153-163, 2012. (In Persian)

[21] H. Mohammadi, K. Hakimi, and E. Ahmadi, "Feasibility of implementing inter-basin water transfer projects in Iran (case study: Beheshtabad-Central Plateau water transfer project)," *Human Geography Research (Geographical Research, vol. 51, no. 4,* 2020. (In Persian) https://doi.org/10.22059/jhgr.2018.248156.1007603

[22] t. sharghi, k. Kalantari, A. Asadi, and m. jomehpour, "Simulating the Simultaneously effects of Climate Change and Policy of Water transfer from Agriculture to Industry on Horticultural Products (Case of Yazd Province)," *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research,* vol. 47, no. 4, pp. 851-863, 2016. (In Persian) https://doi.org/10.22059/ijaedr.2016.61332

[23] m. akaberi, M. Fatemi, and S. Dehghan Khavari, "Projection of Water Supply and Demand in Yazd Province Using the General Regional Equilibrium Pattern," *Geographical Researches,* Original Research vol. 34, no. 3, pp. 403-412, 2019. http://dx.doi.org/10.29252/geores.34.3.403

[24] Y. Yu, X. Si, C. Hu, and J. Zhang, "A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures," *Neural Computation,* vol. 31, no. 7, pp. 1235-1270, 2019. https://doi.org/10.1162/neco_a_01199

[25] A. Graves and A. Graves, "Long short-term memory," *Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks,Vol. 385,* pp. 37-45, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24797-2_4

[26] A. Farzad, H. Mashayekhi, and H. Hassanpour, "A comparative performance analysis of different activation functions in LSTM networks for classification," *Neural Computing and Applications,* vol. 31, pp. 2507-2521, 2019. https://doi.org/10.1007/s00521-017-3210-6

[27] A. Gensler, J. Henze, B. Sick, and N. Raabe, "Deep Learning for solar power forecasting—An approach using AutoEncoder and LSTM Neural Networks," in *2016 IEEE international conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2016, pp. 002858-002865. https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844673

[28] Z. Chang, Y. Zhang, and W. Chen, "Electricity price prediction based on hybrid model of adam optimized LSTM neural network and wavelet transform," *Energy,* vol. 187, p. 115804, 2019. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.134

[29] T. Cooijmans, N. Ballas, C. Laurent, Ç. Gülçehre, and A. Courville, "Recurrent batch normalization," *arXiv preprint arXiv:1603.09025,* 2016. https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.09025

[30] N. K. Manaswi and N. K .Manaswi, "Understanding and working with Keras," *Deep Learning with Applications using Python: Chatbots and Face, Object, and Speech Recognition with TensorFlow and Keras*, pp. 31-43, 2018. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3516-4_2

[31] G. S. Jones *et al.*, "The HadGEM3- GC3. 1 contribution to the CMIP6 detection and attribution model intercomparison project," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 16, no. 8, p. e2023MS004135, 2024. https://doi.org/10.1029/2023MS004135

[32] C. J. Williams *et al.*, "Simulation of the mid-Pliocene Warm Period using HadGEM3: experimental design and results from model–model and model–data comparison," *Climate of the Past*, vol. 17, no. 5, pp. 2139-2163, 2021. https://doi.org/10.5194/cp-17-2139-2021

[33] M. B. Andrews *et al.*, "Historical simulations with HadGEM3- GC3. 1 for CMIP6," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 12 ,no. 6, p. e2019MS001995, 2020. https://doi.org/10.1029/2019MS001995

[34] M. Dix *et al.*, "CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp126," 2019.

[35] K. Haleem, A. U. Khan, J. Khan, A. A. Ghanim, and A. M. Al-Areeq, "Evaluating future streamflow patterns under SSP ۲۴۵scenarios: insights from CMIP6," *Sustainability*, vol. 15, no. 22, p. 16117, 2023. https://doi.org/10.3390/su152216117

[36] N. M. Reddy and S. Saravanan, "Extreme precipitation indices over India using CMIP6: A special emphasis on the SSP585 scenario," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 16, pp. 47119-47143, 2023. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25649-7

[37] J. Schmidli, C. Frei, and P. L. Vidale, "Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods," *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 26, no. 5, pp. 679-689, 2006.

[38] A. Hájek, "Conditional probability," in *Philosophy of statistics*: Elsevier, 2011, pp. 99-135. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51862-0.50003-4

[39] A. C. Horne *et al.*, "Informing environmental water management decisions: Using conditional probability networks to address the information needs of planning and implementation cycles," *Environmental Management*, vol. 61, pp. 347-357, 2018. https://doi.org/10.1007/s00267-017-0874-8

[40] Z. Hao, F. Hao, V. P. Singh, A. Y. Sun, and Y. Xia, "Probabilistic prediction of hydrologic drought using a conditional probability approach based on the meta-Gaussian model," *Journal of Hydrology*, vol. 542, pp. 772-780, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.048

[41] A. O. Anele, E. Todini, Y. Hamam, and A. M. Abu-Mahfouz, "Predictive uncertainty estimation in water demand forecasting using the model conditional processor," *Water*, vol. 10, no. 4, p. 475, 2018. https://doi.org/10.3390/w10040475

[42] S. Yue, "A statistical measure of severity of El Niño events," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 15, pp. 153-172, 2001. https://doi.org/10.1007/PL00009789

[43] R. Rodrigues Mendes Ribeiro, J. Natal, C. Polpo de Campos, and C. Dias Maciel, "Conditional probability table limit-based quantization for Bayesian networks: model quality, data fidelity and structure score," *Applied Intelligence*, pp. 1-21, 2024. https://doi.org/10.1007/s10489-023-05153-8

[44] f. yosefvand, s. shabanlou ,and a. rajabi, "Prediction of Sediment Transport in Sewer Using a Combination of Adaptive-Neuro Fuzzy Inference Systems and Genetic Algorithm," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 31-44, 2019. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v32i4.72720

[45] B. Balouchi, M. R. Nikoo, M. Shafai Bajestan ,and M. Dehghani, "Application of SVR and GRNN Models in Estimating Maximum Scour Depth at River Confluences under Live-Bed Condition," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 79-92, 2017. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v29i1.43654

[46] M. R. Goodarzi, M. Sabaghzadeh, and M. Niazkar, "Evaluation of Snowmelt Impacts on Flood Flows Based on Remote Sensing Using SRM Model," *Water*, vol. 15, no. 9, p. 1650, 2023. https://doi.org/10.3390/w15091650

[47] H. Fattahi, F. Malekmahmoudi, and H. Ghaedi, "Predicting the most important geomechanical parameter of rock mass using the harmony search and teaching learning based optimization algorithms," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 1-18, 2022. (In Persian) 10.22067/jfcei.2022.72095.1056

[48] M. H. Yaqoubi, B. Keshtegar, and H. A. Rahdar, "Model-Based Analysis for Ultimate Axial Load of Circular CFST Columns Using Artificial Neural Network," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 33-48, 2019. (In Persian) https://doi.org/10.22067/civil.v32i3.73399